Biuletyn WAT
Vol. LXV, Nr 4, 2016

Przegląd budowy i funkcjonalności współczesnych bezzałogowych statków powietrznych do celów fotogrametrycznych

PAWEŁ BURDZIAKOWSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geodezji,
80-233 Gdańsk, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, pawelburdziakowski@gmail.com

Streszczenie. Fotogrametria z lotniczych platform bezzałogowych rozumiana jako nowe narzędzie do wykonywania pomiarów łączy możliwości wykonywania pomiarów fotogrametrycznych naziemnych, lotniczych, a nawet suborbitalnych, stanowiąc jednocześnie niskobudżetową konkurencję dla klasycznej fotogrametrii lotniczej czy teledetekcji satelitarnej. W pracy przedstawiono podstawy budowy bezzałogowego statku powietrznego przeznaczonego do lotów fotogrametrycznych (teledetekcyjnych), analizę preferowanego rodzaju platformy oraz przegląd komercyjnie dostępnych komponentów i elementów systemu. Jak pokazują wyniki przedstawionej analizy, preferowaną platformą do wykonywania lotów fotogrametrycznych z ukierunkowaniem na pomiar maksymalnie dużych powierzchni jest szybowiec z napędem elektrycznym. Platforma tego typu charakteryzuje się większą odpornością na działanie wiatru oraz pozwala wykonywać długotrwały lot, w przeciwieństwie do platform typu wielowirnikowiec.
Słowa kluczowe: fotogrametria, teledetekcja, nawigacja, UAV, BSP, COTS
DOI: 10.5604/12345865.1228956

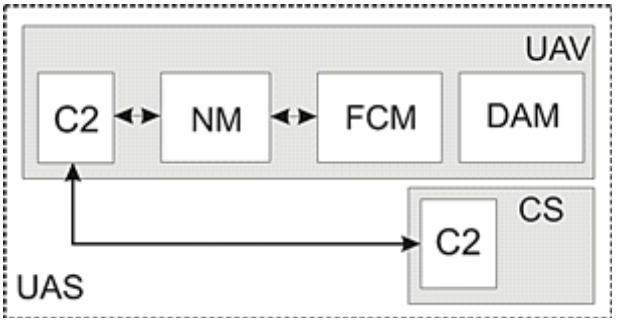
1. Wstęp

Zgodnie z definicją bezzałogowy statek powietrzny (z ang. *Unmanned Aerial Vehicle* — UAV) to napędzany obiekt powietrzny wykonujący lot bez pilota na pokładzie z wykorzystaniem siły aerodynamicznej i nieprzenoszący pasażerów. Równie często określa się te urządzenia synonimem dron czy robot latający. Same BSP funkcjonują z reguły w składzie systemu, zatem właściwszym określeniem jest bezzałogowy system powietrzny (z ang. *Unmanned Aerial System* — UAS), nie

definiuje ono jedynie samego urządzenia latającego, lecz także uwzględnia inne elementy znajdujące się na ziemi niezbędne do wykonywania lotów. Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO) wprowadziła koncepcję zdalnie pilotowanego systemu statku powietrznego (z ang. *Remotely-Piloted Aerial System* — RPAS) [15], który będzie zdolny spełnić wymagania stawiane w lotnictwie cywilnym i zostanie dopuszczony do wykonywania operacji w przestrzeni powietrznej na zasadach opisanych w przepisach lotnictwa cywilnego. W Europie zauważono ogromny potencjał RPAS i podjęto zdecydowane kroki prawne w celu uregulowania działalności RPAS w europejskiej przestrzeni powietrznej. RPAS w ramach niewydzielonej przestrzeni powietrznej muszą posiadać zdolność do wykrywania innych uczestników ruchu oraz być w stanie podejmować działania dostosowawcze, a jeżeli nie posiadają takiej zdolności, ich operacje należy ograniczyć do wydzielonej przestrzeni powietrznej. Ten fakt ogranicza ich swobodne wykorzystanie na rynku cywilnym. Prognozuje się, że RPAS szeroko rozwiną się w zakresie rozwiązań cywilnych, szczególnie w aspekcie realizacji nowych usług logistyki i transportu, ekonomicznie stymulując przy tym gospodarkę [18].

W pracy przedstawiono podstawową budowę BSP przeznaczonych do wykonywania lotów fotogrametrycznych (teledetekcyjnych), przykład wyboru preferowanego rodzaju platformy oraz przegląd komercyjnie dostępnych komponentów i elementów systemu, tzw. COTS (z ang. *Commercial Of-The-Shelf*). Komponenty i systemy komercyjne to gotowe produkty dostępne na rynku handlowym wytwarzane dla ogółu. Nie są wytwarzane na zlecenie czy według szczegółowych specyfikacji wskazanych przez zamawiającego. Zaletą tych produktów jest ich szeroka dostępność oraz niewielka cena, ze względu na masową produkcję. Zastosowanie produktów COTS do budowy bezzałogowego statku powietrznego (BSP) z przeznaczeniem do lotów fotogrametrycznych czy pozyskiwania danych teledetekcyjnych wpisuje się w ideę konstrukcji systemu niskobudżetowego typu *Low Cost* [16].

W skład bezzałogowego systemu powietrznego wchodzi [11, 12, 27, 5]: platforma właściwa (UAV) i stacja kontroli (z ang. *Control Station* — CS) z modułem



Rys. 1. Bloki funkcjonalne systemu bezzałogowego

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

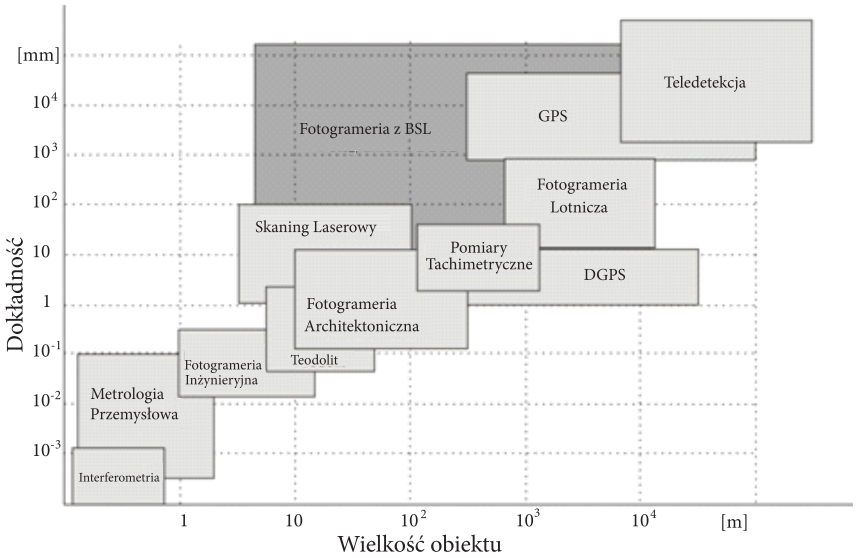
komunikacji i kontroli (z ang. *Communication and Control* — C2). Na platformie właściwej wyróżnia się moduły kontroli lotu (z ang. *Flight Control Module* — FCM) oraz nawigacji (z ang. *Navigation Module* — NM), które są niezbędne do realizacji lotu. Platforma właściwa zdolna jest do przenoszenia dedykowanego ładunku funkcjonalnego. W przypadku platform przeznaczonych do lotów fotogrametrycznych jest to moduł pozyskiwania danych (z ang. *Data Acquisition Module* — DAM) (fotogrametrycznych, teledetekcyjnych) — rysunek 1.

2. Platformy bezzałogowe do celów fotogrametrycznych

2.1. Fotogrametria z platform bezzałogowych

Fotogrametria z platform bezzałogowych rozumiana jako nowe narzędzie do wykonywania pomiarów łączy możliwości wykonywania pomiarów fotogrametrycznych naziemnych, lotniczych, a nawet suborbitalnych, stanowiąc jednocześnie niskobudżetową konkurencję dla klasycznej fotogrametrii lotniczej czy teledetekcji satelitarnej [13].

Zestawienie metod pomiarowych w zależności od wielkości obiektu i dokładności pomiarów przedstawiono na rysunku 2. Modyfikując te zestawienie opublikowane w [22] i [13] oraz uwzględniając aktualne możliwości platform [8], należy



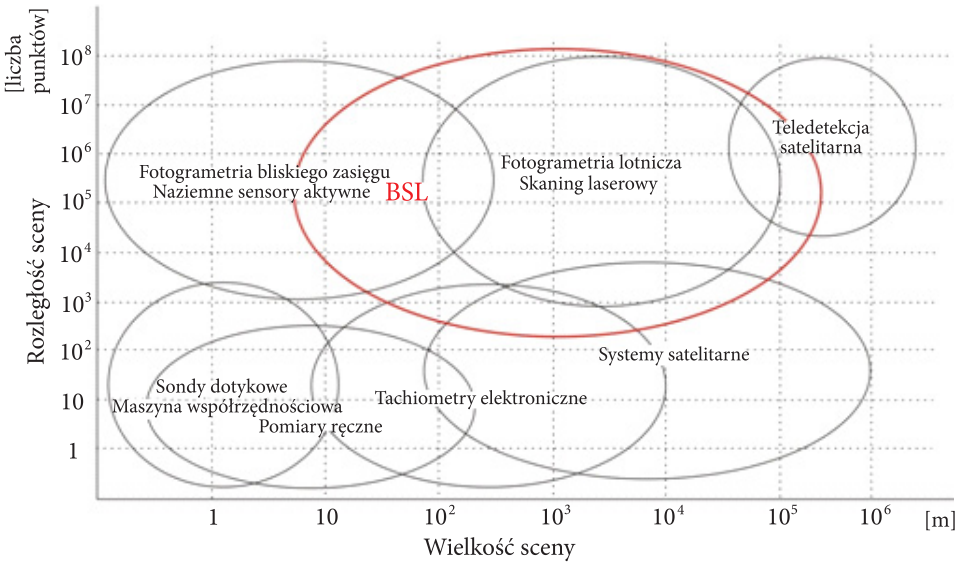
Rys. 2. Metody pomiarowe — dokładność (opracowanie własne na podstawie [8, 13, 22])

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

rozszerzyć możliwości BSP w kierunku teledetekcji satelitarnej. Obecnie konstruuje się już BSP operujące na pułapach suborbitalnych.

Zestawienie metod pomiarowych w odniesieniu do wielkości obiektu i rozległości sceny (liczby punktów w przestrzennym układzie współrzędnych) przedstawiono na rysunku 3. Zestawienie to, w stosunku do źródła [21], zostało uaktualnione o najnowsze dane platform bezzałogowych [8]. Konstrukcje platform kategorii mini lub mikro rozszerzają możliwości pomiarowe w kierunku pomiarów niewielkich obiektów z niewielkich odległości, natomiast platformy operujące na pułapach suborbitalnych pozwalają rozszerzyć możliwości pomiarowe w kierunku teledetekcyjnych pomiarów satelitarnych.

Fotogrametria z platform bezzałogowych wypełnia lukę, jaka występuje pomiędzy fotogrametrycznymi (teledetekcyjnymi) pomiarami naziemnymi a lotniczymi i satelitarnymi, uzupełniając te metody pomiarowe i umożliwiając dotarcie platformy do miejsc, które nie są dostępne dla klasycznych metod, przy zdecydowanie niższym nakładzie finansowym. Fotogrametria z platform bezzałogowych nie jest konkurencją dla istniejących już metod i systemów, natomiast co należy podkreślić, stanowi uzupełnienie. W tym obszarze dużą rolę odgrywają założenia dokładnościowe pomiarów, które dla platform bezzałogowych mogą być nieosiągalne bądź koszt ich osiągnięcia będzie równy bądź większy od istniejących już klasycznych rozwiązań.



Rys. 3. Metody pomiarowe — liczba punktów sceny (opracowanie własne na podstawie [21, 8])

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

2.2. Platforma właściwa

Platforma właściwa stanowi urządzenie zdolne do unoszenia się w atmosferze i przenoszenia ładunku funkcjonalnego. Platforma ta integruje w fizyczny sposób wszystkie elementy techniczne instalowane na jej pokładzie, generuje siłę nośną zdolną przenosić ją samą wraz z ładunkiem funkcjonalnym. Ze względu na harakter wywoływania siły nośnej można wyróżnić platformy cięższe od powietrza (aerodyny) na bazie stałopłatów (z ang. *fixed-wing*), wiropłatów (z ang. *rotor-wing*) oraz miękkopłatów (z ang. *flexible wing*) oraz lżejsze od powietrza (aerostaty). Szczegółowy podział ze względu na charakter wywoływania siły nośnej z uwzględnieniem rodzaju napędu przedstawiono w tabeli 1 [13].

Tabela 1

Podział platform latających ze względu na charakter wywołania siły nośnej [13]

	Aerostat	Aerodyna		
		Stałopłat	Wiropłat	Miękkopłat
Bez napędu	Balon	Szybowiec	Wiroszybowiec	Lotnia
				Paralotnia
				Latawiec
Z napędem	Sterowiec	Motoszybowiec	Wirnik pojedynczy	Motolotnia
		Samolot	Wirnik przeciwbieżny	Motoparalotnia
		Odrzutowiec	Czterowirnikowiec	
			Wielowirnikowiec	

2.3. Stacja kontroli

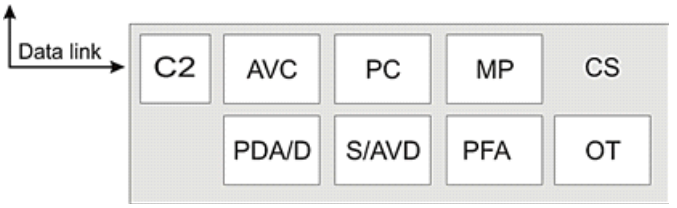
Stacja kontroli stanowi stacjonarny, mobilny lub przenośny zespół urządzeń technicznych wraz z oprogramowaniem, przeznaczonych do kontroli, monitorowania i kierowania platformą bezzałogową. Stacja kontroli może być umiejscowiona na lądzie, na pokładzie jednostki pływającej lub też na innym statku powietrznym, umożliwiając interakcję systemu bezzałogowego z użytkownikiem (operatorem).

Stacja kontroli posiada następujące bloki funkcjonalne (rys. 4) [20]:

— kontroli lotu (z ang. *Air Vehicle Control* — AVC),
— kontroli ładunku funkcjonalnego (z ang. *Payload Control* — PC),
— planowania misji (z ang. *Mission Planning* — MP),
— analizy i rozpowszechniania danych z ładunku funkcjonalnego (z ang. *Payload Data Analysis and Dissemination* — PDA/D),
— diagnostyki systemu (z ang. *System/Air Vehicle Diagnostics* — S/AVD),

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

— treningu operatora (z ang. *Operator Training* — OT),
— analizy wykonanego lotu (z ang. *Post-Flight Analysis* — *PFA*).



Rys. 4. Bloki funkcjonalne stacji kontroli

2.4. Moduł komunikacji i kontroli

Moduł komunikacji i kontroli zapewnia niezbędną wymianę informacji pomiędzy operatorami naziemnej stacji kontroli a systemami platformy latającej. Komunikacja odbywa się w dwóch kierunkach. Sygnały nadawane w kierunku platformy, którymi przekazuje się komendy telesterowania (tzw. *uplink*), oraz sygnały odbierane z platformy, którymi przekazywane są dane telemetryczne (tzw. *downlink*).

Drony używane jako cele artyleryjskie wykorzystują zwykle niechronioną komunikację w zakresie pasma UKF (30-300 MHz), pasma L (1-2 GHz) oraz pasma C (4-8 GHz), natomiast drony szczebla taktycznego wykorzystują komunikację chronioną. W tym celu stosuje się m.in. bezpośrednie modulowanie nośnej sekwencją kodową (z ang. *Direct Sequencing Spread Spectrum Modulation*) lub techniki przeskoku częstotliwości (z ang. *Frequency Hopping Techniques*). Drony używane w celach rozpoznawczych wykorzystują transmisję dwustronnie chronioną kryptograficznie [3].

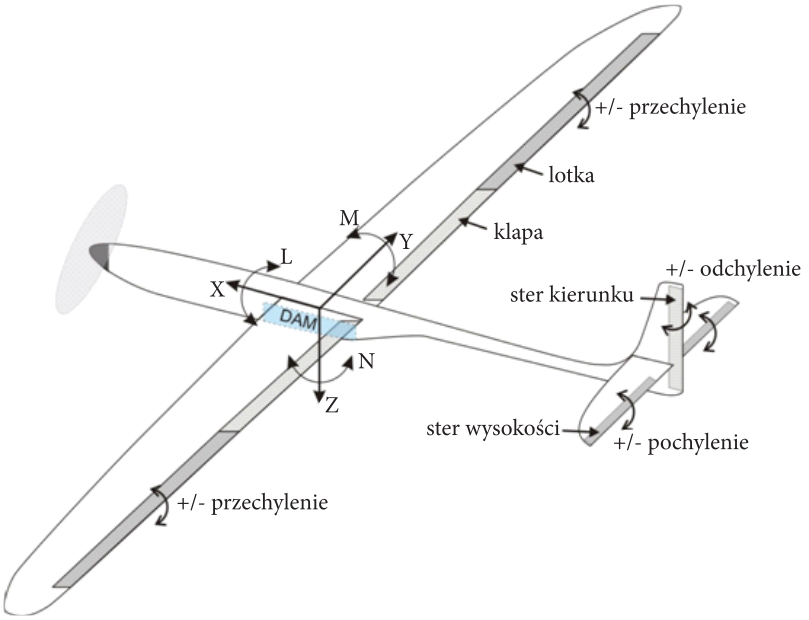
Komunikacja z dronami operującymi na poziomie taktycznym (zwykle do 200 km od naziemnej stacji kontroli) odbywa się z wykorzystaniem naziemnych i/lub powietrznych stacji retranslacyjnych. Rozwiązanie takie nie jest możliwe do zastosowania dla dronów poziomu strategicznego, operujących na znacznych odległościach i wysokościach. Drony poziomu strategicznego wykorzystują satelitarne systemy łączności w celu zapewnienia dwustronnej komunikacji nawet do 5000 km.

2.5. Moduł kontroli lotu i awioniki

Moduł kontroli lotu i awioniki należy zdefiniować jako zespół urządzeń pozwalający na nadanie parametrów lotu bezzałogowego statku powietrznego, czyli skierowanie go na odpowiednią pozycję poprzez nadanie mu określonej orientacji w przestrzeni i wektora prędkości. Moduł ten realizuje również zadanie utrzymania nadanych parametrów lotu. Składa się z dwóch zasadniczych części:

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

— Analizy i wypracowania danych — ta część odpowiedzialna jest za odbiór komend sterowania od operatora systemu, odbiór aktualnych parametrów lotu z sensorów pokładowych, odbiór instrukcji z modułu nawigacji, kompleksową analizę odebranych danych i wydanie komend do korekcji parametrów lotu. Element ten nazywany jest zwykle autopilotem lub automatycznym systemem kontroli lotu.
— Wykonawczej — w której skład wchodzą elementy mechaniczne i elektroniczne realizujące wykonanie zadanej czynności, a są to urządzenia takie jak regulator prędkości obrotowej silników elektrycznych, serwomechanizmy napędzające powierzchnie sterowe wraz z elementami mechaniki napędu powierzchni sterowych.



Rys. 5. Powierzchnie sterowe motoszybowca, układ odniesienia
(opracowanie własne na podstawie [3])

2.6. Moduł nawigacji i orientacji

Moduł nawigacji i orientacji odpowiedzialny jest za ustalenie pozycji i orientacji platformy latającej względem wybranego ziemskiego układu odniesienia. W zależności od przeznaczenia, zasięgu i przede wszystkim rejonu operowania platformy jakość systemów nawigacyjnych i metody określania pozycji mogą się znacznie różnić od siebie. Aktualnie, systemy nawigacyjne BSP można podzielić na następujące grupy:

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

— Systemy nawigacji satelitarnej — stanowią dla współczesnych platform bezzałogowych kluczowe źródło informacji o własnej pozycji. Z uwagi na założenia dokładnościowe oraz wielkość platformy stosuje się różne metody nawigacji satelitarnej, których dokładność rozciąga się od kilku centymetrów do kilku metrów. Metody i osiągana dokładność systemów satelitarnych dla bezzałogowych statków powietrznych zostały opisane w publikacjach [19, 23, 30]. Powszechność i dostępność systemów nawigacji satelitarnych czyni je głównym źródłem informacji nawigacyjnej, niemniej jednak wnoszącym również wiele ograniczeń i problemów, które kierują badaczy do opracowania innych metod nawigacji, uniezależniających nawigację dronów od systemów satelitarnych. Problematyka ta poruszana jest m.in. w publikacji [7].
— Systemy nawigacji bezwładnościowej — inercyjnej — równie popularne i wszechobecne w systemach nawigacyjnych platform bezzałogowych co systemy nawigacji satelitarnej. Jednostki nawigacji inercyjnej oferują zróżnicowaną dokładność, która rośnie wraz z kosztem produkcji takich urządzeń. Jednostki najdroższe oferują bardzo dobrą dokładność, natomiast urządzenia typu Low Cost niestety z nawigacyjnego punktu widzenia nie stanowią rzetelnego źródła informacji i nie są wykorzystywane pojedynczo, ale stanowią część systemu nawigacji, uzupełniając inne systemy [10, 19].
— Systemy nawigacji porównawczej — wykorzystywane obecnie na pokładach wielu systemów bezzałogowych. Źródłem informacji o środowisku może być obraz pozyskiwany z dowolnego urządzenia pasywnego (kamera światła widzialnego, kamera pasma podczerwonego, radar pasywny) bądź aktywnego (radar, sonar, lidar). Istotą systemów i rozwiązań jest wykorzystanie metod [7, 28, 29] porównujących pozyskany obraz z obrazem źródłowym, który stanowić może np. mapa, dzięki czemu możliwe jest określenie pozycji geograficznej platformy.
— Hybrydowe systemy nawigacji — grupę tę stanowią urządzenia, które wykorzystują informację nawigacyjną pochodzącą z innych systemów bądź sensorów oraz poddają obróbce tę informację [30]. W zdecydowanej większości urządzenia te stanowią jeden moduł, który integruje wiele urządzeń i sensorów w jednej zwartej obudowie, np. odbiornik GPS, sensor inercyjny, magnetyczny oraz mikroprocesor z zaimplementowanym algorytmem. Istotą systemów tego typu jest poprawa dokładności nawigacji metodami obliczeniowymi w stosunku do dokładności pojedynczych, osobno wykorzystywanych składowych sensorów systemów hybrydowych. Systemy nawigacji hybrydowej minimalizują jednocześnie niedoskonałości pojedynczych sensorów, które wzajemnie się uzupełniają.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

2.7. Moduł pozyskiwania danych

Moduł pozyskiwania danych fotogrametrycznych lub teledetekcyjnych to zespół urządzeń przenoszonych przez platformę bezzałogową zdolnych do detekcji i rejestracji promieniowania elektromagnetycznego w zakresie wybranego pasma widma. Rodzaj przenoszonego urządzenia oraz jego parametry techniczne są ściśle powiązane z głównym zadaniem stawianym przez system bezzałogowy. Podczas projektowania należy znaleźć kompromis pomiędzy wielkością modułu, jego wagą i aspektami technicznymi montażu w ramach korpusu platformy a wymaganiami, jakie stawiane są w zakresie parametrów detekcji, m.in. czułości, zakresu detekcji, rozdzielczości itp.

3. Wybór platformy

Nie istnieje jedna uniwersalna platforma bezzałogowa, która byłaby zdolna wykonać wszystkie zadania perfekcyjnie. Każda konstrukcja posiada mocne i słabe strony, które w danych warunkach mogą mieć pozytywny wpływ na jakość lotu, a w innych bardzo negatywny. Wybór odpowiedniej platformy należy poprzedzić sprecyzowaniem głównych celów i zadań, jakie stawia się danemu systemowi.

W niżej przedstawionym przykładzie wyboru odpowiedniej platformy przyjęto następujące zadania oraz kryteria względem budowy bezzałogowego systemu powietrznego do celów fotogrametrycznych:

— wykonywanie lotów fotogrametrycznych ukierunkowanych na pomiar maksymalnie dużych powierzchni,
— zdolność do realizacji autonomicznego lotu fotogrametrycznego po zaprojektowanej wysokości oraz wzdłuż projektowanych osi szeregów,
— możliwość przenoszenia kamery, jej spoziomowania i zorientowania wzdłuż kierunku lotu,
— stabilność lotu w różnych warunkach,
— brak ograniczeń względem miejsca startów i lądowania (dostępne jest odpowiednie miejsce, które nie ogranicza wykonywania tego typu manewrów).

Aby znaleźć odpowiedni rodzaj platformy właściwej, opracowano matrycę (tab. 2) właściwości poszczególnych platform według podziału zaprezentowanego w tabeli 1. Określono parametry, które będą brane pod uwagę, i przypisano im odpowiednie wagi. Dla platformy przeznaczonej do lotów fotogrametrycznych przyjęto wagi jak w tabeli 2. Wartości wag mieszczą się w przedziale od 1 do 5. Wartości wag dla każdego rodzaju platformy opracowane zostały na podstawie własnych doświadczeń oraz wyników badań [13, 21]. Parametry przyjmują wartości od 0 do 2, przy czym 0 oznacza najniższe właściwości (zdolności) platformy właściwej w danym parametrze, natomiast wartość 2 najwyższe.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Wynik dla danego rodzaju platformy został obliczony z wyrażenia:

$$R = \sum_{n=1}^{N} w_n p_n \tag{1}$$

W rezultacie przyjętych założeń najwyższą wartość osiągnęła platforma zbudowana na bazie motoszybowca (szybowiec z napędem). Platformy tego typu wykorzystywane są z powodzeniem do celów fotogrametrycznych [1, 4].

Tabela 2

Właściwości platform zależnie od wymaganych parametrów

Parametr (p_n) / Rodzaj platformy		Ładunek	Odporność na wiatr	Prędkość minimalna	Autonomiczność	Przenośność	Droga lądowania	Zasięg	Długość lotu	Manewrowość	Stabilność lotu	**Wynik (R)**
Waga parametru (w_n)		3	2	4	5	3	2	3	3	2	4	
Bez napędu	Balon	2	0	2	0	2	2	0	2	0	1	34
	Latawiec	1	2	2	0	2	2	1	0	0	1	32
	Szybowiec	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	38
	Wiroszybowiec	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	34
	Lotnia	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	38
	Paralotnia	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	34
Z napędem	Sterowiec	2	1	2	2	2	2	2	2	0	1	52
	Motoszybowiec	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	54
	Samolot	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	44
	Odrzutowiec	2	2	0	2	2	0	0	1	1	0	31
	Wirnik pojedynczy	2	1	2	2	2	2	1	1	2	1	50
	Wirnik przeciwbieżny	2	1	2	2	2	2	1	1	2	1	50
	Czterowirnikowiec	2	1	2	2	2	2	1	0	2	1	47
	Wielowirnikowiec	2	1	2	2	2	2	1	0	2	1	47
	Motolotnia	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	48
	Motoparalotnia	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	48

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

3.1. Własności charakterystyczne wybranej platformy

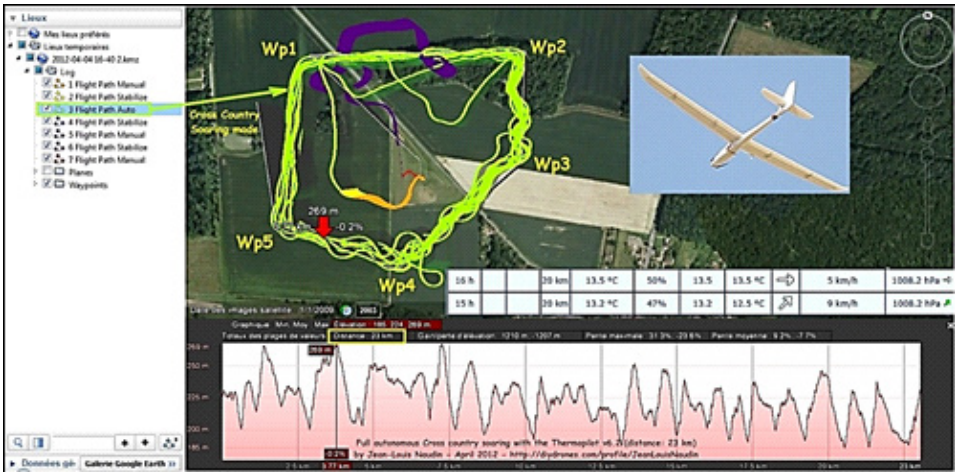
Szybowiec charakteryzuje się przede wszystkim dużą doskonałością aerodynamiczną, znacznie większą niż w innych konstrukcjach. Aktualnie technologia budowy szybowców wykorzystuje materiały kompozytowe bazujące na włóknach węglowych, szklanych i aramidowych, co zapewnia bardzo dużą wytrzymałość i niską wagę. Zastosowanie kompozytów umożliwiło również praktycznie dowolne kształtowanie płatowca, tj. precyzyjną budowę i odwzorowanie kształtu profilu elementów aerodynamicznych (skrzydeł, stateczników czy kadłuba), co jest niezwykle istotne. Używa się technologii formowania próżniowego w formach negatywowych, które są budowane na bazie pozytywów frezowanych precyzyjnymi frezarkami sterowanymi cyfrowo. Technologię taką wykorzystuje się również przy budowie profesjonalnych (wojskowych) BSP. Modele szybowców budowane w oparciu o technologię kompozytową osiągają doskonałości aerodynamiczne znacznie przewyższające duże szybowce, a ich konstrukcja posiada bardzo dużą wytrzymałość. Dlatego też parametry określone w tabeli 2 dla motoszybowca przyjmują wysokie wartości.

Należy zaznaczyć, że zastosowanie aerodyny wymaga pewnej drogi lądowania i startu, co może być dużą przeszkodą w zastosowaniach typowo miejskich bądź tam, gdzie nie ma możliwości wydzielenia odpowiedniego miejsca do startu i lądowania. W celu wyeliminowania tej niedogodności wykorzystuje się drony oparte o wiropłaty, które umożliwiają wykonanie pionowego startu i lądowania (VTOL — z ang. *Vertical Take Off and Landing*) [24]. Jeżeli parametr „droga lądowania" przyjąłby wartości wiodące (wysoka waga), wynik końcowy stawiałby wiropłaty przed konstrukcjami opartymi o aerodynę. W niniejszych rozważaniach przyjęto, że nie będzie to parametr wiodący.

Istotnym faktem, choć nie dość zauważonym jak dotychczas w dziedzinie lotów BSP, jest możliwość wykorzystania prądów wznoszących do wykonywania długotrwałych lotów przy niskim zużyciu energii (z akumulatorów napędowych bądź paliwa) — podobnie jak dzieje się to w szybownictwie. Doskonałość aerodynamiczna motoszybowca oraz możliwość wspomagania startu i lotu silnikiem potencjalnie umożliwia wykorzystanie prądów termicznych do znaczącego przedłużenia lotu. Badania modelowania przelotów termicznych przedstawiono w [6], koncepcję implementacji dla potrzeb BSP zaprezentowano w badaniach [2]. Amatorską implementacje opartą o elektronikę COTS oraz wyniki prób prezentuje się w [31] (rys. 6).

W ocenie autora możliwość wykonania długotrwałego lotu opartego o przeloty termiczne, a przy tym stabilność takiego lotu, brak wibracji oraz hałasu pochodzącego od napędu to cechy, które stawiają ten rodzaj platformy przed innymi, w szczególności w zastosowaniach do rozpoznania, monitoringu oraz fotogrametrii i teledetekcji.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl



Rys. 6. Autonomiczny lot termiczny wykonany w oparciu o elektronikę COTS [31]

3.2. Moduł pozyskiwania danych

Moduł pozyskiwania danych mieści wewnątrz korpusu (zwartej obudowy) urządzenia techniczne rejestrujące dane oraz urządzenia pomocnicze. W przypadku niniejszych rozważań urządzenia rejestrujące stanowić będą kamery rejestrujące promieniowanie wybranego pasma zakresu optycznego widma elektromagnetycznego: kamery pasma widzialnego, pasma podczerwonego, spektralne. Kamery te, ze względu na wielkość platformy, muszą cechować się niewielkimi wymiarami oraz masą, a konkretniej ich wielkość i masa musi być dostosowana do wielkości (nośności) BSP.

Urządzenia pomocnicze umieszczone w tym module działają na korzyść poprawy jakości pozyskiwania i rejestracji danych oraz stanowią inną niezbędną aparaturę współdziałającą z urządzeniem rejestrującym. W tej grupie należy umieścić urządzenia takie jak: stabilizator położenia kamery, dodatkowe nośniki danych, urządzenia bezpiecznego odzyskiwania modułu pozyskiwania danych (w przypadku modułu odrzucanego).

Moduł pozyskiwania danych tworzyć może oddzielny element umieszczony w korpusie (obudowie) lub elementy tego modułu mogą być umieszczone w obrębie konstrukcji platformy. Konstrukcja modułu musi uwzględniać właściwości aerodynamiczne statku powietrznego, szczególnie w przypadku aerodyny. W przeciwieństwie do wiropłatów, kamery i urządzenia stabilizujące umieszczane są bez obudowy, ponieważ w niewielkim stopniu wpływają na aerodynamikę BSP. W tym szczególnym przypadku, gdzie platformą jest motoszybowiec, niezwykle istotne jest,

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

aby moduł pozyskiwania danych nie wpływał negatywnie na aerodynamikę szybowca, dzięki czemu można zachować jego właściwości aerodynamiczne. Autor widzi dwa rozwiązania — umieszczenie niewielkich elementów modułu pozyskiwania danych w obrębie płatowca szybowca lub zastosowanie aerodynamicznej obudowy modułu.

3.2.1. Dane obrazowe — kamery

Platformy oparte na wirnikowcach mają ułatwione zadanie montażu modułu pozyskiwania danych. Z tego powodu obserwuje się bardzo intensywny zalew rynku platformami wirnikowymi typu multicopter (quadrocopter, hexacopter czy octocopter), oferowanymi dla zastosowań profesjonalnych i tych typowo amatorskich. Platformy te niewątpliwie, poza możliwością wykonania pionowego startu i lądowania czy pozostawania w zwisie, mogą przenosić właściwie dowolny ładunek funkcjonalny, który swoją masą nie przewyższa nośności takiej platformy, przy tym nie powoduje negatywnych skutków aerodynamicznych. Nie trzeba uwzględniać oporów aerodynamicznych czy zmian, które wprowadza umieszczenie elementów poza obrysem płatowca, jak w przypadku aerodyn.

Wybór motoszybowca ogranicza dostępność rozwiązań w zakresie kamer pozyskiwania danych. Kamera powinna posiadać niewielkie rozmiary oraz masę, dzięki czemu będzie można ją umieścić w obrysie płatowca lub w obrębie skorupy modułu pozyskiwania danych. W tabeli 3 zestawiono kamery pracujące w różnych zakresach spektralnych możliwych do zastosowania w proponowanym rozwiązaniu, opracowane na podstawie [26].

Tabela 3

Zestawienie kamer

Producent i model	Rozdzielczość [piksel]	Rozmiar matrycy [mm]	Rozmiar piksela [μm]	Zakres spektralny	Liczba klatek / sekundę	Masa [g]	Inne informacje
Kamery światła widzialnego							
Phase One IXU 180	10328 × 7760	53,7 × 40,4	5,2	widzialny	0,37	930	FMC-TDI
Trimble Aerial Camera IQ180	10328 × 7760	53,7 × 40,4	5,2	widzialny	B/D	1500	True FMC
Hasselblad A5D-60	8956 × 6708	53,7 × 40,2	6,0	widzialny	0,42	1360	
Phantom Miro Airborne HD	1920 × 1080	B/D	5,5	widzialny	335	1140	
Sony Nex-7	6000 × 4000	23,5 × 15,6	3,92	widzialny	10	550	
GoPro Hero 4 Black	4000 × 3000	bd	bd	widzialny	2	89	

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

cd. tabeli 3

Kamery spektralne							
Tetracam's Ultra--light 90 Gram	2048 × 1536	6,55 × 4,92	3,2	520-920 nm	0,5-7,5	90	
Tetracam's ADC Lite	2048 × 1536	6,55 × 4,92	3,2	520-920 nm	0,5-7,5	200	
Quest Innovations Condor-3 C3-VNN-692-UAV-SD	1280 × 720 × 3	5,19 × 2,92	4,06	400-1000 nm (3 kanały)	5	350	
Quest Innovations Condor-5 C5-UAV--sCMOS	1360 × 1024 × 3	8,77 × 6,60	6,45	400-1000 nm (5 kanałów)	5/30	1450	
Kamery termowizyjne							
Flir Quark 2 640	640 × 512	10,8 × 8,7	17	7,5-13 µm	25	18,3	LWIR VOx
Flir Tau 2 640	640 × 512	10,8 × 8,7	17	7,5-13 µm	25	72	LWIR VOx
Flir Neutrino	640 × 512	9,6 × 7,6	15	3,4-5,1 µm	25	450	MWIR InSB
Flir TAU 15 × RH	640 × 512	9,6 × 7,6	15	0,6-1,7 µm	25	101	SWIR In-GaAs
Flir Lepton	80 × 60	1,36 × 1,02	17	8-14 µm	8,6	0,55	LWIR

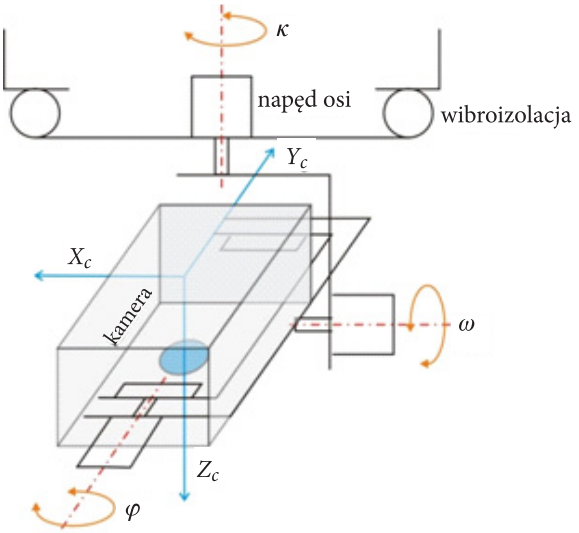
3.2.2. Stabilizacja kamery

Jak wykazano w badaniach [16], zastosowanie tanich sensorów nawigacyjnych o niskiej dokładności uniemożliwia osiągnięcie wymaganej dokładności do określenia parametrów kątowych elementów orientacji zewnętrznej. W tym celu niezbędne staje się zastosowanie stabilizowanego podwieszenia kamery, aby zniwelować gwałtowne odchylenia platformy, tak jak jest to realizowane we współczesnych systemach cyfrowych kamer lotniczych.

W ogólnym ujęciu stabilizacja kamery (z ang. *gimbal*) będzie się składała z pasywnych elementów izolujących układ podwieszenia kamery od wibracji generowanych przez platformę oraz elementów aktywnych stabilizacji, czyli układu napędzanych osi utrzymujących kamerę w stałym położeniu względem wybranego zewnętrznego punktu. Aktualnie w systemach stabilizacji kamer fotogrametrycznych napęd osi stanowi układ hydrauliczny. Napęd osi w systemach stabilizacji opartych o popularną elektronikę bazuje na dwóch rozwiązaniach. Osie napędzane

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

są serwomechanizmami poprzez układ dźwigni lub zawieszone są bezpośrednio na osiach bezszczotkowych silników krokowych (rys. 7).



Rys. 7. Stabilizacja kamery, osi swobody (opracowanie własne)

W przypadku motoszybowca napęd powinien stanowić silnik elektryczny (bezszczotkowy). Wykorzystanie takiego rodzaju napędu nie tylko jest uzasadnione ze względów eksploatacyjnych (łatwość obsługi i utrzymania w sprawności), lecz także napęd elektryczny nie generuje tak dużych drgań na kadłubie jak silnik spalinowy. Dodatkowo, same właściwości aerodynamiczne platformy ułatwiają minimalizowanie wibracji przenoszonych na kamerę. Szybowiec z napędem, szczególnie podczas lotu szybowcowego, generuje minimalne wibracje, wynikające jedynie z aerodynamiki samego płatowca. W takim przypadku silniki lub inne urządzenia pokładowe stanowią niewielkie źródło drgań. Stabilność lotu szybowca dodatkowo ułatwia zastosowanie precyzyjnej i nieco wolniejszej stabilizacji aktywnej kamery. Aerodynamika szybowca umożliwia wykonywanie bardzo stabilnego lotu, na tyle stabilnego, że nie jest wymagane dodatkowe aktywne (lub jedynie bardzo minimalne) ingerowanie powierzchniami sterującymi w czasie lotu.

Mechaniczną stabilizację obrazu, opisaną powyżej, wspomaga się również numerycznymi metodami poprawy jakości i eliminacji rozmazu. W publikacji [9] autor przedstawia metodę poprawy jakości obrazu fotogrametrycznego pozyskanego z niemetrycznych kamer opartych o sensory CCD lub CMOS. Metoda ta może zostać zaimplementowana w niewielkim mikroprocesorze, co stanowi kolejny krok do pozyskiwania lepszych jakościowo obrazów z niewielkich platform opartych na elektronice komercyjnej.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Podczas projektowania lub wyboru systemu stabilizacji kamery należy uwzględnić niezwykle ważny czynnik, który wpływa na aerodynamikę szybowca — opór aerodynamiczny. Jak wykazują autorzy w publikacji [25], podczas projektowania systemu stabilizacji opór aerodynamiczny stawiany przez konstrukcję urządzenia stabilizującego odgrywa kluczową rolę, szczególnie dla mniejszych platform, a w przypadku szybowca opisywanego w niniejszej publikacji będzie to stanowić bardzo znaczący czynnik. Dlatego też składniki takie jak stabilność lotu i niewielka masa kamery umożliwiają wybór mniejszego, wolniejszego i przy tym dokładniejszego systemu stabilizacji, stawiającego mniejszy opór aerodynamiczny.

Mechaniczny układ stabilizacji kamery wyposażony jest w układy sterujące. Komputer sterujący wyposażony jest w moduł sterujący napędem osi oraz moduł detekcji położenia, który zbiera informacje o aktualnym położeniu platformy i na ich podstawie generowane są komendy do modułu sterującego.

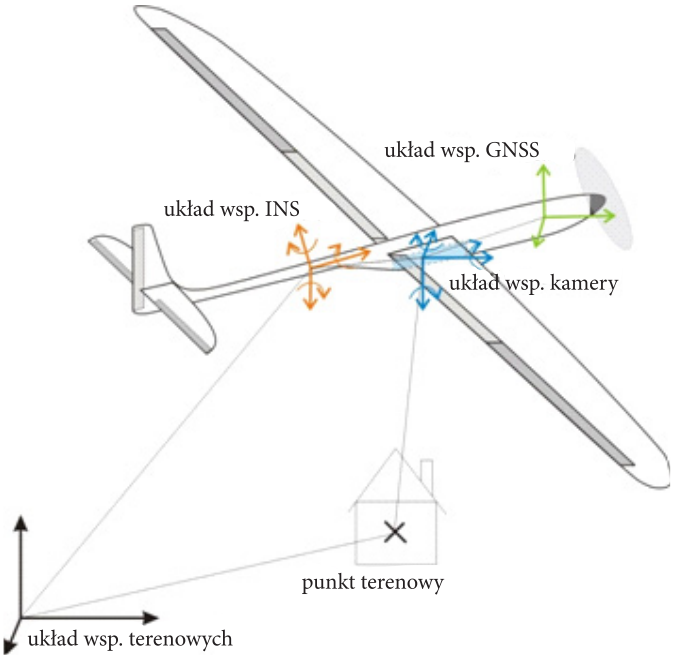
3.3. Nawigacja i orientacja

Określenie elementów orientacji zewnętrznej zdjęć fotogrametrycznych w uproszczeniu oznacza wyznaczenie położenia (pozycji geograficznej) i orientacji kamery w momencie wykonywania zdjęcia. Elementy orientacji zewnętrznej opisują położenie kamery w momencie wykonywania zdjęcia, natomiast pozycja i orientacja jest określona dla położenia wybranego urządzenia nawigacyjnego zainstalowanego na platformie, a więc w obliczeniach należy uwzględnić wzajemne położenie tych elementów oraz chwilowe położenie układu stabilizacji kamery. Ideę wzajemnego położenia układów współrzędnych urządzeń nawigacyjnych i kamery prezentuje rysunek 8.

W opracowaniach fotogrametrycznych dokładność określenia parametrów orientacji zewnętrznej odgrywa dużą rolę, dlatego też moduł nawigacji i orientacji przy niewielkiej masie własnej powinien bardzo dokładnie i z dużą częstotliwością określać położenie i orientację. Jak wynika z danych technicznych urządzeń nawigacji inercyjnej, ich dokładność rośnie wraz z masą własną i ceną. Z uwagi na ograniczoną masę ładunku, jaką może przenosić niewielka platforma, w niniejszej publikacji uwzględniono tylko te komercyjne urządzenia nawigacji i orientacji, których masa całkowita nie przekracza 250 g. W praktyce urządzenia te bazować będą na podzespołach mikroelektromechanicznych — MEMS (z ang. *Micro-Electro Mechanical Systems*). Wykorzystanie tych urządzeń do określenia przybliżonych elementów orientacji zdjęć naziemnych opisuje publikacja [17]. Jakość uzyskiwanych danych z jednostek inercyjnych MEMS nie dorównuje tym, które wypracowane są przez jednostki oparte na żyroskopach światłowodowych — FOG (z ang. *Fiber Optic Gyro*), jednak w przypadku ograniczenia masy zastosowanie urządzeń opartych na FOG staje się niemożliwe. Badania [14] wykazały, że w zastosowaniach gdzie celem jest znacząca redukcja kosztów oraz minimalne obniżenie dokładności,

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

urządzenia MEMS zdają się być najlepszym rozwiązaniem. Urządzenia oparte na FOG zarezerwowane są dla precyzyjnych mobilnych systemów kartujących oraz dla zastosowań militarnych.



Rys. 8. Wzajemne położenie układów współrzędnych

Tabela 4

Zestawienie modułów bezwładnościowych

Producent, model	Masa [g]	BIAS [deg/h]	Data Rate [Hz]	RMS [deg]		
				Roll	Pitch	Heading
Novatel, OEM-STIM300	55	0,5	125	0,015	0,015	0,080
Novatel, OEM-HG1930	200	1	100	0,060	0,060	0,100
Novatel, OEM-ADIS-16488	48	5	500	0,035	0,035	0,150
AIMS, uMotion	90	0,3	30	0,4	0,4	0,4
AIMS, Motion	190	0,2	30	0,4	0,4	0,4

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Tabela 5

Zestawienie modułów nawigacji satelitarnej

Producent, model	GNSS	Masa [g]	L1 [m]	L1/ L2 [m]	SBAS [m]	DGPS [m]	RTK [m]	Terra-star-C [m]	Veripos Apex [m]
Novatel, OEM 615	GPS L1/L2/L2C + GLONASS L1/L2 + SBAS	24	1,5	1,2	0,6	0,4	0,01	bd	bd
Novatel, OEM628	GPS L1/L2/L2C + GLONASS L1/L2 + BeiDou + SBAS + L-Band	37	1,5	1,2	0,6	0,4	0,01	0,04	0,06
Novatel, OEM 625S	GPS L1/L2/L2C + GLONASS L1/L2 + SBAS	56	1,5	1,2	0,6	0,4	0,01	bd	bd
Novatel, OEM638	GPS L1/L2/L2C + GLONASS L1/L2 + BeiDou + SBAS + L-Band	84	1,5	1,2	0,6	0,4	0,01	0,04	0,06
Cloud Cap Technology, DGPS FlightPak	Zawiera moduł Novatel OEM 615	85	1,5	1,2	0,6	0,4	0,01	bd	bd

Tabela 6

Zestawienie hybrydowych modułów nawigacji

Producent, model	GNSS	Masa [g]	BIAS [deg/h]	Data Rate [Hz]	L1 [m]	L1/ L2 [m]	SBAS [m]	DGPS [m]	RTK [m]	Terra-star-C [m]	Veri-pos Apex [m]
Gladiator Technologies, LandMark 40 INS/GPS	GPS, GLONASS, BeiDou, QZSS & SBAS (Galileo), SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS	160	6	100	2	bd	2	bd	bd	bd	bd
Imar Navigaion, iuIMU-01	GPS/WAAS/EGNOS/MSAS	50	1	1000	1,5	2,5	bd	bd	bd	bd	bd
Advanced navigation, Spatial	GPS L1, GLONASS L1, GALILEO E1, BeiDou B1	37	3	1000	2,0	bd	1,0	0,6	bd	bd	bd

3.4. Autopilot

Autopilot (pilot automatyczny) to urządzenie służące do automatycznego kierowania wykonywaniem określonych czynności statku powietrznego. Urządzenie to może występować w postaci oddzielnego modułu, który zasilany jest danymi z modułów nawigacji i orientacji, kontroli lotu i awioniki oraz komunikacji i kontroli.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Bazując na rzeczywistych danych odbieranych z tych modułów oraz zaprogramowanych w pamięci zadaniach (reakcjach na dane), moduł autopilota wydaje komendy do modułu kontroli lotu i awioniki, powodując wykonanie zadanej czynności przez statek powietrzny.

Aktualnie producenci pilotów automatycznych przeznaczonych do niewielkich bezzałogowych statków latających integrują wszystkie moduły (nawigacji, orientacji, kontroli i komunikacji), umieszczając je w jednym zwartym urządzeniu, często dostarczają też autopilota z dedykowaną do współpracy z nim stacją kontroli. Koncepcja integracji wszystkich modułów umożliwia zastosowanie pojedynczego, kompletnego rozwiązania obejmującego wszystkie aspekty autonomicznego lotu dronem. Liczba dodatkowych funkcji świadczy o poziomie technologicznym autopilota. Przodujące rozwiązania na rynku umożliwiają:

— kontrolę wielu różnych typów aerodyny,
— kontrolę ponad 24 serwomechanizmów, uwzględniając w tym różne konfiguracje powierzchni sterowych danego drona, np. rozdzielne klapy, wsparcie dla klapolotki, usterzenie typu Rudlickiego, dzielony ster kierunku, brak steru kierunku lub płatowiec typu latające skrzydło,
— konfigurację częstotliwości oraz typu sygnału sterującego serwomechanizmami — rozszerza to spektrum serwomechanizmów, które mogą zostać zainstalowane na platformie,
— algorytm autonomicznego startu i lądowania,
— algorytm wyprowadzania platformy z sytuacji krytycznej (np. lądowanie awaryjne, wykorzystując autorotację, wyprowadzenie z korkociągu lub przeciągnięcia),
— wejście systemu wizyjnego przewidzianego do transmisji obrazu z pokładu platformy do stacji kontroli,
— odbiór pełnej oferty systemów nawigacji satelitarnej łącznie z RTK GPS,
— algorytmy wspierające nawigację (powrót do bazy) w przypadku utraty sygnału ze stacji kontroli,
— stację kontroli i oprogramowanie do treningu operatora (symulacji),
— autopilot współpracujący z wieloma stacjami kontroli,
— funkcję przekazywania platformy pomiędzy kolejnymi stacjami kontroli umieszczonymi na trasie przelotu,
— nanoszenie informacji nawigacyjnych lub o stanie systemów pokładowych na tor wizyjny,
— transmisję pełnych danych telemetrycznych do stacji kontroli,
— pełną sensorykę typu: żyroskopy, akcelerometry, magnetometry, kompas magnetyczny, wysokościomierz laserowy (radarowy, barometryczny), wariometr itp.,
— kontrolę kamery pokładowej.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Zestawienie kilku niewielkich i powszechnie dostępnych na rynku autopilotów prezentuje tabela 7.

Tabela 7

Zestawienie autopilotów

Producent, model	Masa [g]	Żyroskop	Akcelerometr	Magnetometr	GPS	DGPS	RTK	Kontrola radiowa	Stacja naziemna
Cloud Cap Technology, Piccolo Nano	29	N	N	N	T	T	N	T	N
MicroPilot, MP2128	24	T	T	N	T	T	T	T	T
ACS Sp. z o.o., FCS-2	50	T	T	N	T	N	N	N	T
PitLab Piotr Laskowski, AutoPitLot	bd	T	T	T	T	N	N	N	N
AirWare, Flight Core	74	T	T	N	T	N	N	N	N
ArduPilot, 3DR Pixhawk	38	T	T	T	T	N	N	N	T

4. Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono podstawową budowę BSP przeznaczonych do wykonywania lotów fotogrametrycznych (teledetekcyjnych), przykład wyboru preferowanego rodzaju platformy oraz przegląd komercyjnie dostępnych komponentów i elementów do budowy wybranego systemu. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, do wykonywania lotów fotogrametrycznych ukierunkowanych na pomiar maksymalnie dużych powierzchni najodpowiedniejszą platformą jest statek powietrzny zbudowany na bazie motoszybowca. Gotowy model motoszybowca wykonanego z kompozytów można wyposażyć w dodatkowe urządzenia i wykonywać loty, aby uzyskać informację fotogrametryczną. Jak wykazano, rynek oferuje wszystkie elementy wyposażenia i moduły funkcjonalne takiej platformy. Producenci komercyjnych modułów bezzałogowych statków powietrznych dostarczają kompleksowe rozwiązania przewidziane do tych celów. Moduły te są często zintegrowane w postaci jednego urządzenia umieszczonego w zwartej obudowie. Oferta obejmuje również oprogramowanie do planowania i analizy lotów oraz oprogramowanie do stacji kontroli.

Koszt pozyskiwania informacji fotogrametrycznej z bezzałogowego statku powietrznego jest zdecydowanie niższy w porównaniu z tradycyjną fotogrametrią lotniczą. Loty fotogrametryczne wykonywane z bezzałogowych statków powietrznych cechują się niższą jakością i dokładnością ze względu na ograniczenia dopuszczalnej masy urządzeń i modułów, które można zastosować na danej platformie. Niedogodności te są ciągłą inspiracją dla badaczy do opracowania systemów, urządzeń

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

czy metod poprawiających dokładność i jakość pozyskiwanych informacji, co również wykazano w niniejszej pracy.

Nieustanny rozwój platform bezzałogowych umożliwia już wykonywanie lotów suborbitalnych. Suborbitalne autonomiczne loty bezzałogowe są już w fazie realizacji i testów, co tylko dowodzi, że fotogrametria i teledetekcja z platform bezzałogowych w niedługim czasie uzyska nowe możliwości, bliskie systemom satelitarnym, lecz przy nieporównywalnie niższym koszcie.

Niniejsza praca została sfinansowana ze środków własnych.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.11.2015 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 6.10.2016 r.

LITERATURA

[1] Ahmad A., *Digital mapping using low altitude UAV*, Pertanika Journal of Science and Technology, 19, 2011, 51-58.

[2] Allen M.J., *Autonomous soaring for improved endurance of a small uninhabited air vehicle*, In Proceedings of the 43rd aerospace sciences meeting, AIAA, January 2005.

[3] Austin R., *Unmanned aircraft systems. UAVS Design, Development and Deployment*, Wiley, 2010.

[4] Bakuła K., & Ostrowski W., *Zastosowanie cyfrowej kamery niemetrycznej w fotogrametrii lotniczej na wybranych przykładach*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 24. 2012.

[5] Beard R.W., Kingston D., Quigley M., Snyder D., Christiansen R., Johnson W. & Goodrich M., *Autonomous vehicle technologies for small fixed-wing UAVs*, Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2(1), 2005, 92-108.

[6] Brożyna J., Laudański L.M., *Komputerowa symulacja schematów przelotów termicznych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 245, 2007.

[7] Burdziakowski P., Przyborski M., Janowski A., Szulwic J., *A vision-based unmanned aerial vehicle navigation method*, IRMAST 2015, 2015.

[8] Burdziakowski P., *Bezzałogowe statki powietrzne*, Przegląd Morski, 06, 2011.

[9] Chabok M., *Eliminating and modelling non-metric camera sensor distortions Caused by sidewise and forward motion of the UAV*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(1/W2), 2013, 73-79.

[10] Chao H., Coopmans C., Di L., & Chen Y., *A comparative evaluation of low-cost IMUs for unmanned autonomous systems. In Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, 2010 IEEE Conference, IEEE, pp. 211-216.

[11] Colomina I., & de la Tecnologia P.M., *Towards a New Paradigm for High-Resolution Low-Cost Photogrammetry and Remote Sensing*, In The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China, 37, 2008, Part B, vol. 1, pp. 1201-1206.

[12] Colomina I., Molina P., *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 2014, 79-97.

[13] Eisenbeiss H., *UAV photogrammetry*, Zurich, Switzerland: ETH, 2009.

[14] Goodall C., Carmichael S., El-Sheimy N., Scannell B., *INS face off MEMS versus FOGs*, InsideGNSS, vol. 7, 2012, 48-55.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

[15] ICAO Circular 328, *Unmanned Aircraft Systems (UAS)*, Technical Report, International Civil Aviation Authority, Montreal, Canada.

[16] Kędzierski M., Wierzbicki D., Wilińska M., Fryśkowska A., *Analiza możliwości wykonania aerotriangulacji zdjęć cyfrowych pozyskanych kamerą niemetryczną zamontowaną na pokładzie bezzałogowego statku latającego bez systemu GPS/INS*, Biuletyn WAT, 62, 4, 2013, 241-251.

[17] Kolecki J., *Wykorzystanie jednostki IMU typu MEMS do określenia przybliżonych elementów orientacji zdjęć naziemnych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 24, 2012.

[18] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego i Rady, *Nowa era w dziejach lotnictwa — otwarcie rynku lotniczego na cywilne wykorzystanie systemów zdalnie pilotowanych statków powietrznych w bezpieczny i zrównoważony sposób* — COM(2014) 207 final, Bruksela, 8.04.2014 r.

[19] Kraszewski T., Kaniewski P. and Kubicki I., *Systemy nawigacyjne miniaturowych bezzałogowych statków powietrznych*, Biuletyn WAT, 62, 4, 2013, 155-177.

[20] Natarajan G., *Ground control stations for unmanned air vehicles (Review Paper)*, Defence Science Journal, 51, 3, 2002, 229-237.

[21] Nex F., Remondino F., *UAV for 3D mapping applications: a review*, Applied Geomatics, 6, 1, 2014, 1-15.

[22] Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., *Close range photogrammetry: Principles, methods and applications*, Whittles, 2006, 1-510.

[23] Leyssens J., *GNSS positioning for UAV Applications*, In International Symposium Light Weight Unmanned Aerial Vehicle Systems and Subsystems, Oostende (Belgium), March 2009.

[24] Przyborski M., Szczechowski B., Szubiak W., Szulwic J., Widerski T., *Photogrammetric development of the threshold water at the dam on the vistula river in Wloclawek from unmanned aerial vehicles (UAV)*, SGEM2015 Conference Proceedings, 18-24 June, Book 3 vol. 1, Bulgaria, 2015, 493-500.

[25] Quigley M., Goodrich M., Griffiths S., Eldredge A., Beard R.W., *Target acquisition, localization, and surveillance using a fixed-wing mini-UAV and gimbaled camera*, In Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference, April 2005, IEEE, pp. 2600-2605.

[26] *RPAS YEARBOOK 2013*, 13 edition.

[27] Sawicki P., *Bezzałogowe aparaty latające UAV w fotogrametrii i teledetekcji — stan obecny i kierunki rozwoju*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 23, 2012.

[28] Stateczny A., *The methods of the comparative navigation*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk, 2004.

[29] Stateczny A., *Comparative navigation*, Gdansk Science Society, Gdańsk, 2001.

[30] Wang J., Garratt M., Lambert A., Wang J.J., Han S., Sinclair D., *Integration of GPS/INS/vision sensors to navigate unmanned aerial vehicles*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, 2008, 963-970.

[31] http://diydrones.com/profiles/blogs/full-autonomous-cross-country-soaring-flights-with-the, dostęp 10.2016.

P. BURDZIAKOWSKI

A review of construction and functionality of photogrammetric unmanned aerial vehicles

Abstract. A photogrammetry from an unmanned aerial vehicle (UAV) can be understood as a new measurement tool. It introduces low-cost alternatives for a traditional aerial photogrammetry, combining

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

terrestrial, aerial, and satellite photogrammetry techniques. This paper presents a photogrammetric UAV construction basics, a recommended platform analysis, and a review of commercially available components and systems' elements designed for photogrammetric UAV purposes. As the results show, a motoglider can be recommended as a platform for a photogrammetric task, where the priority is to execute the maximum area coverage during one flight. That platform type is resistant to windy conditions and is able to execute long flight, opposite to multirotor platforms.
Keywords: photogrammetry, remote sensing, navigation, unmanned aerial vehicle, commercial of-the-shelf
DOI: 10.5604/12345865.1228956

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl